

Ruidos de la zona costera del mar en la salida de un sistema de correlación pluricanal

Resumen

Se considera el problema de evaluación de los niveles de correlación de los ruidos del mar a los que se producen en la zona costera en la salida de un sistema de correlación con elementos receptores como arreglos discretos lineales. Como modelo de zona de emisión de ruidos se toma una línea con distribución uniforme de fuentes elementales no coherentes. La correlación local de las fuentes se toma en cuenta por medio de la introducción de la directividad de las fuentes elementales de emisión. Para modelar los diferentes perfiles de la zona costera, la línea se representa como una curva de segundo orden (la curvatura de la línea costera se modela mediante los parámetros de la curva). En este artículo se considera el caso de orientación vertical de la base y las antenas con posibilidad de compensación de antenas en la semiesfera superior. Para el modelo propuesto, se obtienen expresiones para calcular las funciones de correlación en la salida de las antenas receptoras. Con base a las expresiones obtenidas se han estudiado los niveles de correlación de los ruidos de zona costera en la salida de los sistemas de correlación y se evalúa la influencia de los ruidos de este tipo al funcionamiento de los sistemas de correlación. Se dan las recomendaciones para elegir el diapasón de los ángulos de compensación de las antenas del sistema en condiciones de la presencia de ruidos de la zona costera.

1. Introducción

El problema de la detección de fuentes de señales en presencia de ruidos y la estimación de las direcciones de estas fuentes se ha estudiado durante muchos años. Uno de los métodos más efectivos para detectar las fuentes de señales es la utilización de los arreglos

discretos de sensores. Los métodos de detección de señales por medio de los arreglos de sensores con la presencia de ruido se describen a detalle, por ejemplo, en Steinberg [1] y Pillai [2]. Dichos métodos tienen muchas aplicaciones en campos como la sismología, la astronomía, la comunicación. Los arreglos de sensores se utilizan efectivamente en los sistemas radar y sonar, los cuales deben ser capaces de funcionar en condiciones de presencia de ruido y en condiciones cuando el ruido puede tener características temporales y espaciales parecidas a las características de las señales útiles.

Uno de los métodos más efectivos para tratar la tarea de detección de señales con utilización de arreglos de sensores, es descomponer el arreglo entero de los sensores en dos segmentos separados y considerar el sistema obtenido como un caso particular de sistemas que utilizan arreglos discretos. Este enfoque fue propuesto por Chen [3] y Fuchs [4] y después fue desarrollado por Chen y otros [5].

Otro enfoque para el problema de detección de señales en presencia de ruidos es la utilización de los métodos de correlación. Los métodos de correlación, por regla, se utilizan para construir sistemas para detección de señales débiles con espectros parecidos a los espectros del ruido. El aumento de la efectividad de los sistemas de correlación, en este caso, se alcanza por medio de la utilización los elementos receptores como arreglos discretos de los sensores. Los sistemas de este tipo, por regla, utilizan el tratamiento de señales en la banda ancha de frecuencias. En el caso de presencia en la escena de un conjunto de fuentes de señales, la función de correlación en la salida del sistema de correlación tendrá un cierto número de máximos correspondientes a las fuentes de las señales.

Este enfoque fue implementado primeramente para las antenas continuas y después para las antenas discretas para un caso particular de ruidos dinámicos del mar por Arkhipov y otros en [6]. En [7] Arkhipov demostró la posibilidad de utilizar los sistemas de este tipo para detectar las señales en presencia de ruidos cuando ambos tienen espectros idénticos. En [8] Arkhipov demostró que los sistemas de este tipo se pueden utilizar efectivamente para detectar señales en presencia de ruidos de la superficie del mar. En dicho trabajo se han mostrado las posibilidades de reducir la correlación de los ruidos de la superficie del mar en la salida del sistema por elección de los parámetros de las antenas y en particular por elección del grado de distribución de las antenas en el espacio.

Otra tarea importante es investigar la posibilidad de utilizar dichos sistemas en presencia de ruidos cuando tienen la localización alta en el espacio y cuando las características de correlación de ellos están parecidas a las características de correlación de las señales útiles (las fuentes de señales útiles, por regla, tienen una localización alta en el espacio).

2. Formulación del problema y la elección del diapasón de frecuencias

En condiciones de agitación desarrollada de la superficie del mar los ruidos en una región costera en un grado significativo se determinan por los procesos dinámicos de destrucción de las olas en la costa o en la zona de rompimiento y por las reflexiones numéricas de las ondas acústicas de la superficie y del fondo del mar en la región de la cuña costera. En el caso de utilizar sistemas de correlación para la detección de fuentes de señales débiles y el funcionamiento de dichos sistemas en distancias de un orden de mil metros desde la costa, es necesario elegir una banda de frecuencias que permitiría tener antenas de tamaños razonables y al mismo tiempo proveería la directividad necesaria de ellos. En particular, la filtración de frecuencias bajas del espectro permite excluir la influencia de ruidos que se prolongan por largas distancias con reflexiones numéricas en zonas costeras. Esto también permite tener antenas con los tamaños, cuales permiten mantener la directividad suficiente para tener un alto nivel de correlación de señales útiles. Por

otra parte, la eliminación de bajas frecuencias del espectro provoca el aumento de la localización de la zona de generación de ruidos de rompimiento y por la secuencia, provoca el aumento de niveles de correlación de ruidos de la zona costera.

La tarea de esta investigación está basada del método elegido de extracción de las señales por un sistema de correlación con elementos receptores como arreglos discretos lineales y con el espectro operativo elegido evaluar los niveles de correlación de los ruidos del mar que se producen en una zona costera en la salida de un sistema de correlación y dar las recomendaciones para elegir los parámetros del sistema en dichas condiciones.

Las investigaciones de Balin y otros [9] del campo ruido de la zona de rompimiento mediante un modelo de cuña con fronteras suaves y con el espectro ancho de frecuencias (se supone la filtración de las frecuencias bajas) muestran, que para los sistemas de correlación con una orientación vertical de las antenas en distancias de orden de mil metros, una zona de rompimiento se puede considerar como una zona de generación de ruido con una extensión grande en el plano horizontal y con una extensión pequeña en plano vertical. Los resultados de Balin y otros [9] permiten utilizar un modelo simplificado de la zona de rompimiento para estudiar el caso de un sistema de correlación y el espectro de señales y las distancias asignadas arriba. Especificamos un modelo de zona de emisión de ruidos y el espectro de las señales.

Como modelo de la zona de emisión de los ruidos tomamos una línea infinita alineada con la línea de rompimiento a lo largo de la cual se distribuyen de manera uniforme y continua las fuentes elementales no coherentes de ruido. La correlación local de las fuentes elementales la tomamos en cuenta por medio de introducción de la directividad de las fuentes de emisión.

Desatenderemos la directividad de las fuentes del modelo elegido en el plano vertical. En el plano, que se determina por la tangente a la línea de rompimiento y el punto de recepción, la directividad de las fuentes del ruido se puede aproximar por la siguiente expresión:

$$F(f) = \cos^p f, \quad (1)$$

donde f es el ángulo entre una normal a la línea de rompimiento en dicho plano y una dirección al punto

de recepción, p es el valor del grado de directividad de las fuentes de ruido para el modelo elegido.

La prolongación grande de la zona de generación de ruidos nos obliga a tomar en consideración la atenuación de los ruidos por la distancia la cual aumenta con el crecimiento de la frecuencia. El coeficiente de atenuación en una banda ancha de las frecuencias se determina por la expresión [10]:

$$\beta(f) = \frac{\beta_i f^2}{f_i^2 + f^2} + \beta^2, \quad (2)$$

donde

f es la frecuencia de la señal, kHz;

f_i es la frecuencia de distracción (que es un valor recíproco del tiempo de distracción de las moléculas de los compuestos de sal en agua, por regla del magnesio sulfúrico agrio o del ácido bórico, dependiendo de la frecuencia de las señales), kHz;

β, β^2 son los coeficientes que se determinan por el diapasón de las frecuencias de las señales.

Concretizamos el espectro de energía $G(\omega)$ de las señales en la salida del sistema después de la filtración. Al introducir un espectro de energía de excitación $S(\omega)$ de los ruidos dinámicos del mar en la zona de rompimiento y la característica transitoria de energía $F^2(\omega)$ de los canales receptores del sistema de correlación, podemos representar por la siguiente formula: $G(\omega) = S(\omega) \times F^2(\omega)$.

Suponemos que el espectro de energía de los ruidos del mar en la zona de excitación en la banda de frecuencias operativas del sistema tiene una inclinación de 5.6 dB/octava [10]. Suponemos también que la característica transitoria de energía $F^2(\omega)$ de los canales se forma por los filtros de banda ancha. Escribiremos estas características por medio de la utilización de los exponentes de segundo orden:

$$S(\omega) = S A_i \exp(-b_i \omega^2 / a^2), \quad (3)$$

$$F^2(\omega) = [1 - \exp(-b_5 \omega^2 / a^2)]^2 \times \exp(-b_6 \omega^2 / a^2), \quad (4)$$

donde $a; A_i, i=1..4; b_i, i=1..6$ son los parámetros del espectro y de los filtros.

El filtro de banda ancha está compuesto por un filtro de frecuencias altas de segundo orden y un filtro de frecuencias bajas de primer orden. Al elegir la frecuencia central de banda de frecuencias, podemos definir los

parámetros del espectro. Como fue indicado arriba para tener los tamaños razonables de las antenas receptoras (las antenas deben tener la directividad suficiente con tamaños que permitan mantener el alto nivel de correlación de las señales útiles) la banda de frecuencias operativas se debe colocar en diapasón de frecuencias de sonido (unidades de kilohertz). Sea el parámetro $a = p \times 10^{-4} s^{-1}$, que determina la frecuencia característica cíclica del espectro que corresponde a la frecuencia lineal de 5 KHz. Definimos los valores de otros parámetros del espectro A_i y b_i como sigue: $A_1=0.0165$; $A_2=0.064$; $A_3=0.1968$; $A_4=0.7227$; $b_1=b_6=0.125$; $b_2=b_5=1.0$; $b_3=4.0$; $b_4=24.0$. El espectro de ruido $G(\omega)$ en la salida de las antenas sin tomar en cuenta la atenuación se representa en la figura. 1.

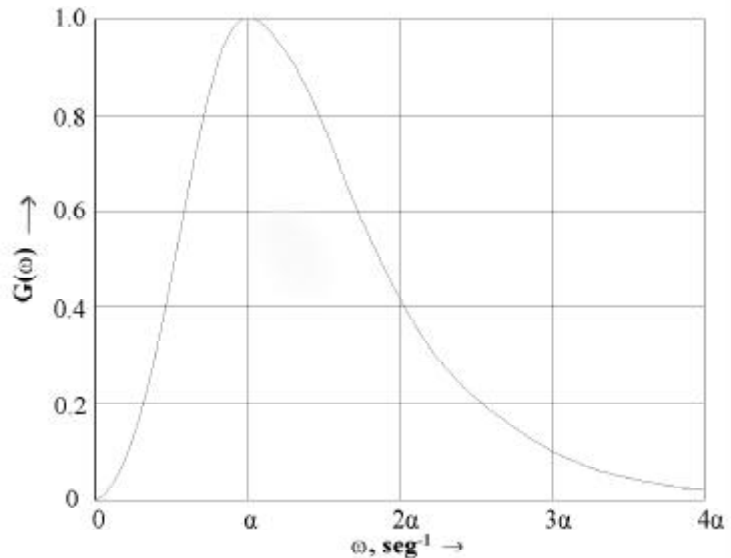


Figura 1. El espectro de ruido $G(\omega)$ en la salida de las antenas sin tomar en cuenta la atenuación.

De acuerdo con la figura 1 la energía de frecuencias operativas del sistema en general se coloca en el diapasón desde 2.5 KHz hasta 10 KHz. Para este diapasón el valor de la frecuencia de distracción f_i podemos tomarla igual a 1 KHz [11]. En el caso de $f_i=1$ KHz la expresión (2) para el coeficiente de atenuación $\beta(\omega)$ se simplifica y convierte en la siguiente expresión:

$$\beta(\omega) = \beta_i \omega^2 + \beta^2. \quad (5)$$

Notamos que en la última expresión (5) el coeficiente de atenuación depende del segundo grado de frecuencia. Con las características de espectro introducidas arriba, las cuales también dependen del

segundo grado de frecuencia, nos permite tener expresiones relativamente simples para el cálculo de las características de correlación.

3. Características de correlación de ruidos de la zona de rompimiento del mar en la salida del sistema

Obtendremos la expresión para la función de correlación de los ruidos de la zona de rompimiento del mar en la salida del sistema de correlación. Consideraremos el caso en el cual el sistema receptor está en la zona de Fraunhofer relativamente próxima a las fuentes de excitación, es decir, podemos considerar los frentes de ondas acústicas en la zona de recepción como frentes planos de cualquier dirección de caída. La caída del frente de una onda acústica de una fuente elemental se muestra en la figura 2.

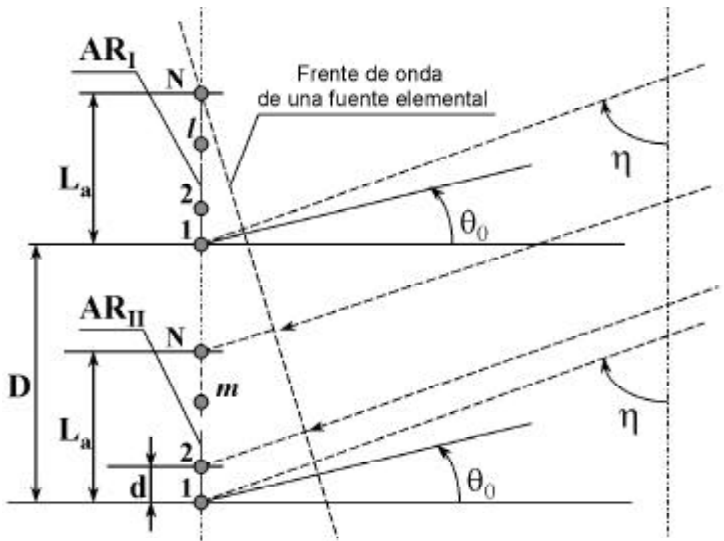


Figura 2. Antenas receptoras en el caso de la presencia de una onda plana de una fuente elemental.

En la figura 2 se muestran antenas receptoras (antena receptora AR_I y antena receptora AR_{II}). La longitud de las antenas se designa como L_a , d es el paso de las antenas, N es el número de elementos receptores en cada antena. D es la distancia entre los centros geométricos de las antenas, θ_0 es el ángulo de compensación de las antenas. El ángulo h es el ángulo de llegada de una onda acústica de una fuente elemental de excitación.

Introducimos un sistema polar de coordenadas. Alineamos el origen del sistema de coordenadas con el centro de la base de correlación y el eje polar con una normal a la superficie del mar. En este sistema de coordenadas la expresión para la función de correlación de ruidos de una fuente elemental en la salida de una pareja de elementos receptores, un elemento con índice l de antena AR_I y un elemento con índice m de antena AR_{II} , suponiendo que el campo de ruidos en volumen ocupado por las antenas es homogéneo y la estacionalidad del campo en el intervalo de evaluación de sus características se representa como:

$$K\rho_{r,12}(t, \mathbf{r}_l, \mathbf{r}_m) = \frac{1}{32\pi^3} \times \int_{-\infty}^{\infty} \frac{G(\omega) \Phi(\mathbf{r}_l, \rho) \Phi(\mathbf{r}_m, \rho) \exp\{j\omega [t - (\mathbf{r}_l - \rho) \cdot \mathbf{r} - (\mathbf{r}_m - \rho) \cdot \mathbf{r}] / c - j\beta |\mathbf{r}_l - \rho| |\mathbf{r}_m - \rho| / d\omega\}}{|\mathbf{r}_l - \rho| \times |\mathbf{r}_m - \rho|} d\omega, \quad (6)$$

donde $G(\omega)$ es el espectro de energía de las señales en las salidas de los canales receptores de las antenas; $\mathbf{r}$ - el radio-vector que determina las coordenadas de la fuente de excitación;

$\mathbf{r}_l$, $\mathbf{r}_m$ son radio-vectores que determinan las coordenadas de los elementos receptores de las antenas AR_I y AR_{II} ;

$F(\mathbf{r}_l, \mathbf{r})$, $F(\mathbf{r}_m, \mathbf{r})$ - las características de directividad de la fuente de emisión en las salidas de receptores con coordenadas $\mathbf{r}_l$, $\mathbf{r}_m$;

β es el coeficiente de atenuación;

t - el retardo de tiempo;

c - la velocidad del sonido.

Introducimos las variables $R_l = |\mathbf{r}_l - \mathbf{r}|$ y $R_m = |\mathbf{r}_m - \mathbf{r}|$. Al establecer estas designaciones podemos escribir la expresión para la función de correlación de una fuente elemental en la salida de los elementos receptores con índices l y m de la siguiente forma:

$$K\rho_{r,12}(t, \mathbf{r}_l, \mathbf{r}_m) = \frac{1}{32\pi^3} \times \int_{-\infty}^{\infty} \frac{G(\omega) \Phi(\mathbf{r}_l, b) \Phi(\mathbf{r}_m, b) \exp\{j\omega [t - (R_l - b) \cdot \mathbf{r} - (R_m - b) \cdot \mathbf{r}] / c - j\beta |R_l - b| |R_m - b| / d\omega\}}{R_l R_m} d\omega, \quad (7)$$

En caso de una onda plana y cuando el tamaño de la base receptora $|R_l - R_m| \ll R_l, R_m$, podemos introducir $R^2 = R_l R_m$ y $F^2(f) = F(\mathbf{r}_l, \mathbf{r}) F(\mathbf{r}_m, \mathbf{r})$, el ángulo f es el ángulo en la expresión (1).

Introducimos también una distribución de intensidad del sonido a lo largo de línea costera $J(L)$. Escribimos la expresión de la función de correlación de ruidos del modelo introducido de la zona de rompimiento en la salida del par de elementos de antena:

$$K_{12}(t,D) = \frac{1}{32\pi^2} \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 \frac{\gamma(\Gamma) \Phi_2(\theta) \Phi_3(\theta) \exp\{j\omega(t - (R^2 - R^2)/c)\} - 5\gamma(R) \exp\{j\omega t\}}{\gamma_0} \cdot (8)$$

La expresión para la función de correlación $K_{12}(t,D)$ en la salida del sistema se puede describir como una suma de las funciones de correlación $K_{12}(t, r_p, r_m)$ particulares de todas las bases de correlación de los elementos receptores de las antenas AR_I y AR_{II} :

$$K_{12}(t,D) = \sum_{l=1}^N \sum_{m=1}^N K_{12}(t, r_p, r_m) = \frac{1}{32\pi^2} \sum_{n=-N-1}^{n=N-1} (N-|n|) \times$$

$$\times \int_{-1}^1 \frac{\gamma(\Gamma) \Phi_2(\theta)}{\gamma_0} \int_{-1}^1 \frac{\exp\{j\omega(t - (R^2 - R^2)/c)\} - 5\gamma(R) \exp\{j\omega t\}}{\gamma_0} \cdot (9)$$

donde

q el ángulo de elevación al elemento dL ($q = \pi/2 - h$, donde h es la coordenada polar del elemento dL en el sistema de coordenadas introducido);

q_0 el ángulo de compensación de las antenas.

Para la integración utilizaremos una integral de tabla [12]:

$$\int_0^\infty \exp(-a^2 x^2) \cos bx dx = \frac{\sqrt{\pi}}{2a} \exp(-b^2/4a^2), \text{ si } a > 0. \quad (10)$$

Después de la integración de la expresión (9) por la variable u tenemos la siguiente expresión:

$$K_{12}(t,D) = \frac{1}{32\pi^2} \sum_{n=-N-1}^{n=N-1} (N-|n|) \int_L \frac{a_1 \pi J(L) \exp(-\zeta R) \Phi^2(\varphi)}{R^2} \times$$

$$\times \sum_{l=1}^4 \{A_l \int \frac{\exp[-\frac{\tau_l^2 \alpha^2}{4(b_l + b_7)}]}{2\sqrt{b_l + b_7}} - \frac{\exp[-\frac{\tau_l^2 \alpha^2}{4(b_l + b_8)}]}{2\sqrt{b_l + b_8}} + \frac{\exp[-\frac{\tau_l^2 \alpha^2}{4(b_l + b_9)}]}{2\sqrt{b_l + b_9}} \} dL, \quad (11)$$

donde $t_A = t - D/c \times \sin q - nd/c(\sin q - \sin q_0)$;

$$b_7 = b_6 + 2 \cdot a_1^2 R_1;$$

$$b_8 = b_5 + b_6 + 2 \cdot a_1^2 R_1;$$

$$b_9 = 2b_5 + b_6 + 2 \cdot a_1^2 R_1;$$

$$a_1 = a \cdot 10^{-3};$$

$$R_1 = R \cdot 10^{-3}.$$

Los parámetros del espectro de energía tienen los siguientes valores: $a = p \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$, $A_1 = 0.0165$; $A_2 = 0.064$; $A_3 = 0.1968$; $A_4 = 0.7227$; $b_1 = b_6 = 0.125$; $b_2 = b_5 = 1.0$; $b_3 = 4.0$; $b_4 = 24.0$.

Para tener la posibilidad de evaluar la influencia de la estructura espacial de la línea costera en las características de correlación y al mismo tiempo tener

un modelo bastante simple de escribir matemáticamente, utilizaremos como una aproximación de línea costera una línea canónica de segundo orden, concretamente una rama de hipérbola con el foco a y con parámetros A y B los cuales determinan las asíntotas de la hipérbola. La colocación mutua de la línea de la zona de rompimiento y el punto de ubicación del sistema receptor se muestra en la figura 3.

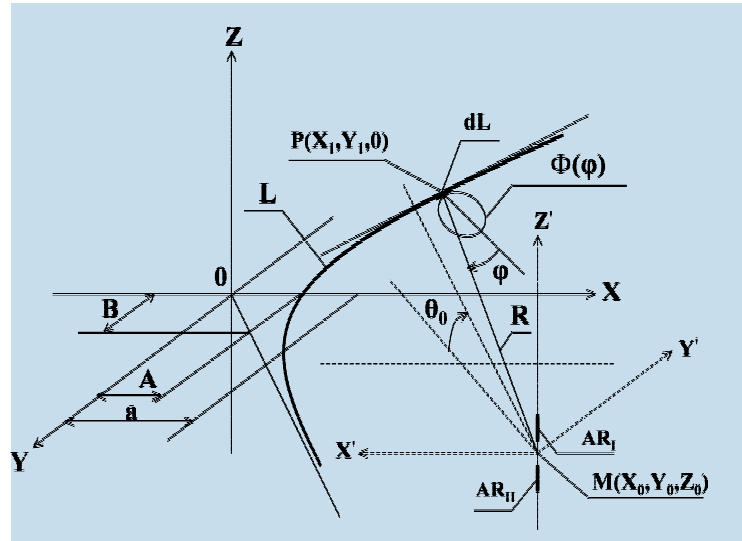


Figura 3. Colocación mutua de la línea de la zona de rompimiento y el punto de ubicación del sistema receptor

En la figura 3 el punto $M(X_0, Y_0, Z_0)$ es el punto de ubicación del sistema de correlación en el sistema de coordenadas xyz . Se introduce también el sistema de coordenadas $x'y'z'$ con el principio colocado en el centro geométrico de sistema receptor.

Para la integración de la expresión (11) introducimos un sistema nuevo de coordenadas hiperbólicas u, v, z [13] de tal modo que:

$$x = a \operatorname{ch} u \cos v,$$

$$y = a \operatorname{sh} u \operatorname{sen} v,$$

$$z = z.$$

Con la introducción de nuevo sistema de coordenadas, y al tomar en cuenta que $F(f) = \cos^2 f$, la función de correlación $K_{12}(t,D)$ se escribe por la siguiente expresión:

$$K_{12}(t,D) = \frac{1}{32\pi^2} \sum_{n=-N-1}^{n=N-1} (N-|n|) \int_{-\infty}^{\infty} \frac{a^2 \pi J(u) \exp(-\zeta R) \cos^2 v \varphi}{R^2} \times$$

$$\sum_{i=1}^4 \{A_i f \frac{\exp[-\frac{\tau_A^2 \alpha^2}{4(b_i + b_7)}]}{2\sqrt{b_i + b_7}} - \frac{\exp[-\frac{\tau_A^2 \alpha^2}{4(b_i + b_8)}]}{2\sqrt{b_i + b_8}} + \frac{\exp[-\frac{\tau_A^2 \alpha^2}{4(b_i + b_9)}]}{2\sqrt{b_i + b_9}}\} \times \exp[-\frac{\tau_A^2 \alpha^2}{4(b_i + b_7)}] \times \exp[-\frac{\tau_A^2 \alpha^2}{4(b_i + b_8)}] \times \exp[-\frac{\tau_A^2 \alpha^2}{4(b_i + b_9)}] \quad (12)$$

donde f es el ángulo entre una normal a la línea de rompimiento en el plano que se determina por la tangente a la línea de rompimiento y el punto de recepción y una dirección al punto de recepción (ver la figura 3); R es la distancia entre el punto de colocación del sistema y el elemento du de la línea.

La distancia R entre el punto de colocación del sistema $M(X_o, Y_o, Z_o)$ y el elemento du se determina por la expresión:

$$R = \sqrt{(Achu - X_o)^2 + (Bshu - Y_o)^2 + Z_o^2}. \quad (13)$$

El ángulo f se determina por la expresión (ver la aplicación A):

$$\varphi = \arcsin \left\{ \sqrt{\frac{(Achu - X_o)^2 + (Bshu - Y_o)^2}{(Achu - X_o)^2 + (Bshu - Y_o)^2 + Z_o^2}} \right\} \times \sin[\arctg \left| \frac{Ashu(Achu - X_o) + Bchu(Bchu - Y_o)}{BX_oChu - AY_oShu - AB} \right| \}. \quad (14)$$

Para determinar la hipérbola utilizaremos un parámetro $C=B/A$. Investigaremos las funciones de correlación en la salida del sistema del modelo propuesto de ruidos de la zona de rompimiento para los siguientes casos:

- el punto de ubicación M del sistema tiene coordenadas constantes X_o, Y_o, Z_o , además $X_o > A$, el parámetro variable es C ;
- el punto de ubicación del sistema tiene coordenadas constantes, además $X_o = 0$, el parámetro variable es C (se modela la situación, cuando el sistema está ubicado cerca de la parte saliente de la costa);
- las coordenadas X_o, Z_o y el parámetro C son constantes, la coordenada Y_o es variable (el punto de recepción se desplaza paralelo del eje y).

La influencia de la compensación de las antenas receptoras en las características de correlación se investiga para el caso de la degeneración de la hipérbola en una línea recta ($C=10$).

4. Resultados de la simulación de las características de correlación

La simulación de las características fue realizado para los siguientes valores de los parámetros de las antenas receptoras: $L_a=1.8\text{m}$; $N=25$; $D=2 \cdot L_a$; $Z_o = -400\text{m}$. Los valores de los parámetros del modelo de la zona de rompimiento fueron tomados como sigue: $J(u)=\text{const}$; $p=0.5$; $A=4000\text{m}$. El ángulo de compensación en todos los casos (excepto el caso del estudio de la influencia de la compensación de las antenas en las características de correlación) se determina de acuerdo con la fórmula:

$$\varphi_o = \arctg(Z_o / |X_o - A|). \quad (15)$$

Las funciones de correlación normalizadas se determinan por la fórmula:

$$R_{12}(t) = K_{12}(t, D) / K_{12}(0, 0). \quad (16)$$

Los gráficos se construyen para una variable adimensional $x_t = at$. Los resultados de la simulación de las características de correlación se representan en las figuras 4, 5, 6 y 7. En las figuras 4 y 5 se muestran las características de correlación normalizadas $R_{12}(x_t)$ para $C=0.5$; 1.0; 10 y $X_o=8000\text{m}$ (figura 4) y para $X_o=0\text{m}$ (figura 5). En la figura 6 se muestran las características $R_{12}(x_t)$ para $X_o=8000\text{m}$, $C=1$, $Y_o=0\text{m}$; 1000m; 2000m; 3000m. Las características en la figura 7 habían sido calculadas para $X_o=8000\text{m}$, $Y_o=0\text{m}$; $C=10$ y con el paso del ángulo de compensación q_o de 20° .

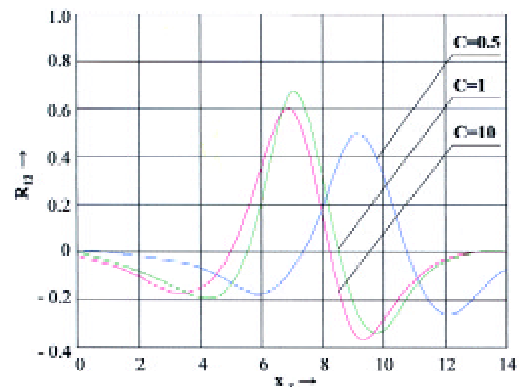


Figura 4. Características de correlación de ruidos de la zona de rompimiento; $A=4000\text{ m}$; $X_o = 8000\text{ m}$; $Y_o = 0\text{ m}$; $Z_o = -400\text{ m}$; $C=0.5$; 1.0; 10.

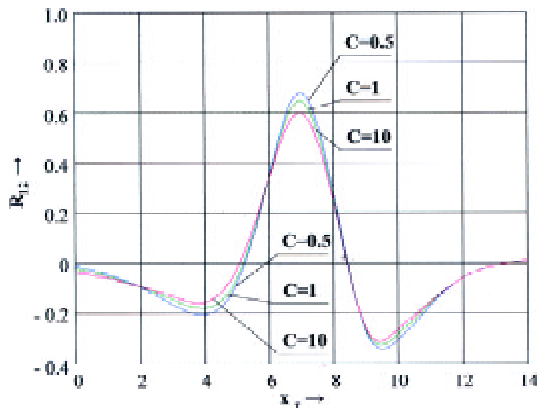


Figura 5. Características de correlación de ruidos de la zona de rompimiento; $A=4000$ m; $X_0 = Y_0 = 0$ m; $Z_0 = -400$ m; $C=0.5; 1.0; 10$.

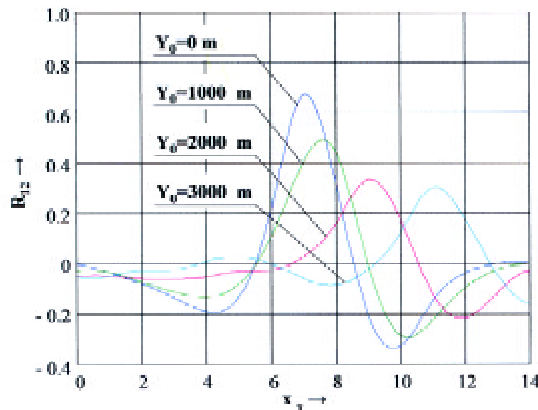


Figura 6. Efecto del desplazamiento del punto de instalación del sistema en las características de correlación de ruidos de la zona de rompimiento; $A=4000$ m; $C=1.0$; $X_0 = 8000$ m; $Z_0 = -400$ m; $Y_0 = 0$ m; 1000 m; 2000 m; 3000 m.

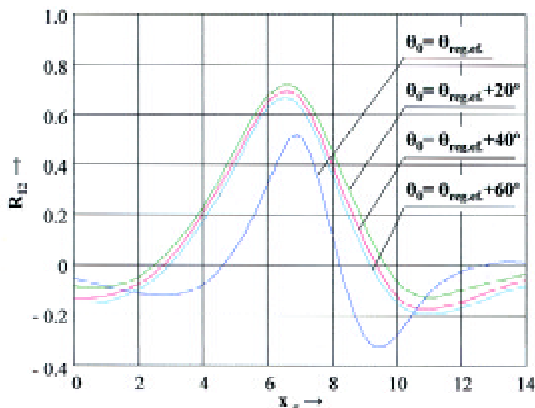


Figura 7. Efecto de compensación de las antenas en las características de correlación de ruidos de la zona de rompimiento; $A=4000$ m; $C=10$; $X_0 = 8000$ m; $Y_0 = 0$ m; $Z_0 = -400$ m;

Para analizar los resultados de simulación de las características de correlación introducimos el concepto de región efectiva de emisión de ruido de la zona de rompimiento y definámosla como una región, la cual determina la aportación fundamental en la energía de ruidos en salidas de antenas.

Apuntamos primero que el nivel de correlación de ruidos de la zona de rompimiento es bastante alto y compone los valores desde 0.3 a 0.67 (ver las figuras 4 y 5). El nivel de correlación depende de la posición mutua del punto de colocación del sistema y la línea de la costa. En las figuras 4 y 5 podemos también observar la dependencia del nivel de correlación de la estructura espacial de la zona de ruidos determinada por el parámetro C . La investigación de la influencia de estructura espacial de la zona de rompimiento (del grado de curvatura de la línea de rompimiento), determinada por el parámetro C , muestra que mayores valores de niveles de correlación se observan para los casos cuando la región efectiva de emisión de ruido de la zona de rompimiento tiene la localidad alta en plano vertical (ver la figura 4, $C=1.0$ y la figura 5, $C=0.5$).

En el caso del desplazamiento del punto de recepción paralelamente al eje y (la geometría de la línea de rompimiento se mantiene) tiene lugar un aumento del tamaño angular de la región efectiva de la zona de rompimiento, que produce la disminución gradual del nivel de correlación de la zona de rompimiento hasta los valores de orden 0.3..0.35 (ver la figura 6).

Consideraremos la influencia de la compensación de las antenas receptoras en la correlación de ruidos de la zona de rompimiento. Las características representadas en la figura 7 muestran que los valores mínimos de correlación son observados en el caso de coincidencia del ángulo de compensación θ_0 de antenas con el ángulo de elevación al centro de la región efectiva de la zona de emisión de ruido y designado como $\theta_{reg,ef}$. En el caso de aumento del ángulo de compensación se observa la ampliación del máximo principal de la función $R_{12}(x_i)$ y también el aumento del nivel del máximo principal de $R_{12}(x_i)$ (ver la figura 7, $\theta_0 = \theta_{reg,ef}$; $\theta_0 = \theta_{reg,ef} + 20^\circ$). El aumento de nivel de correlación alcanza 35%. Este efecto se puede explicar por la recepción de ruidos de la zona de rompimiento por el campo lateral de las antenas receptoras en la región de frecuencias bajas del espectro, donde la discorrelación

de los ruidos de la zona de rompimiento por la extensión espacial es menos. Pero con aumento ulterior del ángulo de compensación el crecimiento de correlación se para e incluso se observa la disminución del nivel de correlación (ver la figura 7, $\varphi_0 = \varphi_{\text{reg ef}} + 40^\circ$; $\varphi_0 = \varphi_{\text{reg ef}} + 60^\circ$). Este efecto se explica por la disminución brusca de la aportación de las frecuencias bajas de ruido en el espectro de energía de ruidos por la filtración de señales en diapasón de frecuencias desde 0 hasta 5KHz .

5. Evaluación de la efectividad de supresión de ruidos de rompimiento

Consideraremos el coeficiente de supresión de los ruidos de la zona de rompimiento por las antenas receptoras. Primero definimos el coeficiente de transferencia de ruidos de la zona de rompimiento por las antenas como una razón de la varianza de los ruidos de la zona de rompimiento en la salida de la antena y la varianza de los ruidos en la salida de una antena sin directividad con la misma cantidad de elementos receptores (todos los elementos receptores se concentran en el centro geométrico de la antena). De esta manera el coeficiente se determina por la siguiente expresión:

$$B_r = K_{12}(0,0) / [N^2 K'_{12}(0,0)], \quad (17)$$

donde $K_{12}(0,0)$ y $K'_{12}(0,0)$ son las varianzas de los ruidos de la zona de rompimiento en la salida de la antena de N elementos con directividad y en la salida del receptor unidireccional respectivamente.

El coeficiente de supresión de los ruidos de zona de rompimiento lo definimos como el recíproco al coeficiente B_r .

Consideraremos cómo depende el coeficiente de supresión de ruidos B_r^{-1} del ángulo de compensación de antenas φ_0 . Los valores de los parámetros de las antenas y del modelo de ruidos se toman iguales a los valores tomados durante el cálculo de las características de correlación: $L_a = 1.8\text{m}$; $N = 25$; $D = 2 \cdot L_a$; $I(u) = \text{const}$; $p = 0.5$; $A = 4000\text{m}$. El parámetro de configuración de la línea de rompimiento tiene un valor $C = 10$. Las coordenadas de punto de recepción son los siguientes: $X_o = 8000\text{m}$; $Y_o = 0\text{m}$; $Z_o = -200\text{m}$; -400m . Los resultados de simulación se representan en la figura 8.

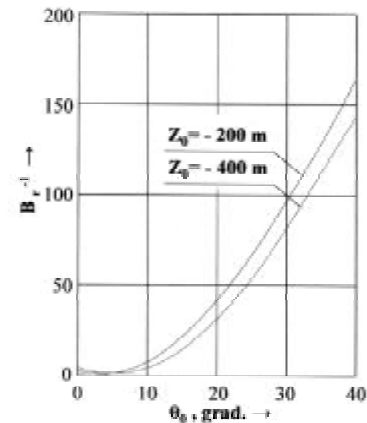


Figura 8. El coeficiente de supresión de ruidos de rompimiento B_r^{-1} .

Las curvas de la figura 8 muestran, que los valores mínimos de B_r^{-1} se observan cuando tiene lugar la compensación de las antenas al centro de la región efectiva de emisión de ruidos (cuando $\varphi_{\text{reg ef}} = \varphi_0$), con aumento del ángulo de compensación φ_0 el coeficiente B_r^{-1} crece por el aumento del grado de supresión de los ruidos de la zona de rompimiento. En los gráficos podemos ver que para las distancias operativas consideradas del sistema la efectividad de supresión de los ruidos de rompimiento en el diapasón de los ángulos de compensación desde 0° hasta 10° es muy poca. Notamos también que para el funcionamiento normal del sistema en modo de detección de las fuentes de señales en presencia de ruidos es necesario tener una distribución entre los máximos de función de correlación de señales útiles y del ruido de rompimiento en el eje de retardos de tiempo.

Encontramos una frontera baja de los ángulos de compensación de las antenas la cual permitía tener la distribución de los máximos. Para caracterizar el diapasón de retardos de tiempo ocupados en el eje de retardos por el máximo principal de la función de correlación de los ruidos de rompimiento introducimos el intervalo de correlación [14] de ruidos en la salida de las antenas como: $\tau_{\text{cor}} = \frac{2\pi}{\Delta\omega} \approx \frac{2\pi}{\Delta\omega} \approx \frac{2\pi}{\Delta\omega}$, donde $R(t)$ es la función normalizada de correlación en la salida de las antenas receptoras, la integración por t se realiza desde 0 a ∞ . Contamos con que el intervalo de retardos de tiempo, donde la función de correlación de los ruidos de la zona de rompimiento puede afectar al funcionamiento del sistema es doble intervalo de correlación $2\tau_{\text{cor}}$. Si la colocación del máximo de función

$R_{12}(x_i)$ se determina como $\theta_{\text{reg ef}} = \arcsen(t_{\text{reg ef}}/t_D)$, donde $t_D = D/c$, entonces la frontera baja del diapasón de los ángulos de compensación de las antenas para el funcionamiento efectivo del sistema de correlación en la presencia de los ruidos de rompimiento se determina por la expresión:

$$\theta_{0, \text{frontera baja}} = \arcsen((t_{\text{reg ef}} + 2t_{\text{corr}})/t_D). \quad (18)$$

El coeficiente de supresión de los ruidos para ángulo $\theta_{0, \text{frontera baja}}$ se puede calcular por la fórmula (17), o se puede evaluar con el gráfico en la figura 8. Por ejemplo, para la profundidad de instalación del sistema a 400 metros y la distancia horizontal hasta la línea de la costa de 4000 metros ($C=10$) tenemos: $\theta_{\text{reg ef}} = 5.7^\circ$. Para el espectro considerado de las señales en la salida de las antenas con un intervalo de correlación $t_{\text{corr}} = 1.11 \times 10^{-4}$ segundos. Al utilizar la fórmula (18) tenemos $\theta_{0, \text{frontera baja}} = 10.75^\circ$, y desde el gráfico tenemos el coeficiente de supresión $B^{-1}_r = 5$ (ver la figura 8, $Z_0 = -400$ metros).

6. Conclusión

En el presente artículo se han considerado las características de correlación de ruidos de la zona de rompimiento del mar en la salida de un sistema de correlación con elementos receptores como arreglos discretos lineales. Hemos considerado una orientación vertical de la base receptora y las antenas receptoras. En la calidad de un modelo de la zona de rompimiento ha sido tomada una línea infinita alineada con la línea de rompimiento a lo largo de la cual se distribuyen de manera uniforme y continua las fuentes de ruido con directividad débil. Para modelar los diferentes perfiles de la zona costera la línea se representa como una curva del segundo orden. Se ha elegido un modelo de espectro de señales de banda ancha para tener en la salida del sistema las características de correlación con sólo un máximo. En la base de los modelos desarrollados se han obtenido expresiones para calcular las funciones de correlación de ruidos de zona de rompimiento en la salida de las antenas y el coeficiente de supresión de ruidos por las antenas tomando en cuenta la atenuación de los ruidos con la distancia en la banda ancha. En base a las expresiones obtenidas se ha demostrado que para el espectro de señales y el modelo de la zona de rompimiento introducidos los niveles de correlación en la salida del sistema alcanzan los valores de 0.5..0.7 y la colocación del máximo en eje de detecciones se

determina por el ángulo de elevación al centro de la región efectiva de la zona de rompimiento $\theta_{\text{reg ef}}$. Se ha mostrado que el nivel de correlación de ruidos de rompimiento se determina por el tamaño angular de zona de rompimiento en el plano vertical. Se han investigado los efectos de compensación de las antenas receptoras, mostrado que la diferencia entre el ángulo de elevación al centro de la región efectiva de la zona de rompimiento y el ángulo de compensación de las antenas lleva a un aumento del nivel de correlación de ruidos de la zona de rompimiento hasta de un 35%. Hemos investigado la efectividad de supresión de los ruidos de la zona de rompimiento. Se ha obtenido la expresión para encontrar la frontera baja del diapasón de ángulos de compensación de las antenas ($\theta_{0, \text{frontera baja}}$) para el funcionamiento efectivo del sistema de correlación en presencia de ruidos de rompimiento. Los resultados presentados se pueden utilizar en el diseño de sistemas de correlación subacuáticos para los casos de manipulación de señales débiles de banda ancha.

7. Aplicación

Consideraremos el plano $z=0$ (ver la figura 3). Encontraremos el ángulo θ , el cual está colocado en el plano $z=0$ y que se determina por una normal a la hipérbola en el punto $P(X_I, Y_I, 0)$ y una proyección en el plano $z=0$ de la línea que conecta el punto $P(X_I, Y_I, 0)$ y el punto $M(X_0, Y_0, Z_0)$. La ecuación de una normal a la hipérbola se describe en la siguiente forma:

$$\frac{y - Y_I}{x - X_I} = - \frac{A^2 Y_I}{B^2 X_I}, \quad (A.1)$$

donde A y B son los semiejes de la hipérbola.

La parte derecha de ecuación (A.1) es el coeficiente angular de la línea que está representada por (A.1). Designamos el coeficiente angular de la normal como k_I .

El coeficiente angular de la línea que conecta los puntos $P(X_I, Y_I, 0)$ y $M(X_0, Y_0, 0)$ se describe como:

$$k_2 = \frac{Y_0 - Y_I}{X_0 - X_I}, \quad (A.2)$$

El ángulo entre la normal (A.1) y la línea que conecta los puntos $P(X_I, Y_I, 0)$ y $M(X_0, Y_0, 0)$ se determina por la expresión:

$$\psi = \arctg \left| \frac{k_2 - k_I}{1 + k_2 k_I} \right| \quad (A.3)$$

Al sustituir las partes derechas de (A.1) y (A.2) en (A.3) obtenemos:

$$\psi = \arctg \left| \frac{\frac{X_0^2 - X_1^2}{B_0^2 X_0^2} + \frac{X_0^2 - X_1^2}{B_1^2 X_1^2}}{\frac{X_0^2 - X_1^2}{B_0^2 X_0^2} - \frac{X_0^2 - X_1^2}{B_1^2 X_1^2}} \right| = \arctg \left| \frac{B_1^2 X_0^2 - B_0^2 X_1^2}{B_1^2 X_0^2 + B_0^2 X_1^2} \right|$$

Al utilizar las coordenadas hiperbólicas u, v, z , las coordenadas del punto M podemos escribir a través de la variable de integración u : $X_1 = A chu$, $Y_1 = B shu$. Al sustituir las variables X_1 e Y_1 expresadas a través de u en la expresión (A.4) obtenemos:

$$\begin{aligned} \psi &= \arctg \left| \frac{A^2 B X_0 shu - A^2 B shu A chu + B^2 A Y_0 chu - B^2 A chu B shu}{B^2 A X_0 chu + B^2 A^2 ch^2 u - A^2 B Y_0 shu + A^2 B^2 sh^2 u} \right| = \\ &= \arctg \left| \frac{A X_0 shu - A^2 shu chu + B Y_0 chu - B^2 chu shu}{B X_0 chu + B A ch^2 u - A Y_0 shu + A B sh^2 u} \right| = \\ &= \arctg \left| \frac{A shu(A chu - X_0) + B chu(B shu - Y_0)}{B X_0 chu - A Y_0 shu + A B} \right|. \end{aligned} \quad (A.5)$$

Encontramos el ángulo f . El ángulo f se determine por la ecuación:

$$R \sin f = r \sin \varphi, \quad (A.6)$$

donde r - la distancia entre los puntos $P(X_1, Y_1, 0)$ y $M(X_0, Y_0, 0)$,

R - la distancia entre los puntos $P(X_1, Y_1, 0)$ y $M(X_0, Y_0, Z_0)$.

Al expresar las distancias R y r por medio de las coordenadas hiperbólicas:

$$R = \sqrt{(A chu - X_0)^2 + (B shu - Y_0)^2 + Z_0^2}, \quad (A.7)$$

$$r = \sqrt{(A chu - X_0)^2 + (B shu - Y_0)^2}, \quad (A.8)$$

tenemos la expresión final para el ángulo f :

$$\begin{aligned} \varphi &= \arcsen \left\{ \sqrt{\frac{(A chu - X_0)^2 + (B shu - Y_0)^2}{(A chu - X_0)^2 + (B shu - Y_0)^2 + Z_0^2}} \right\} \times \\ &\times \text{sen}[\arctg \left| \frac{A shu(A chu - X_0) + B chu(B shu - Y_0)}{B X_0 chu - A Y_0 shu - A B} \right|] \}. \end{aligned} \quad (A.9)$$

Bibliografía

1. STEINBERG B.D.
1976 Principles of Aperture and Array System Design. New York, John Wiley and Sons.
2. PILLAI S.
1989 Array Signal Processing, Springer-Verlag, Berlin.
3. CHEN W., REILLY J. P. WONG K.M.
1991 Application of canonical correlation analysis in detection in the presence of spatially correlated noise, SPIE Int. Sym. Opt. Appl. Sci. & Engng. - advanced signal processing

algorithms, architectures and implementations, San Diego, CA, USA, 21.26 July, Vol. II.

4. FUCHS J.J.

- 1992 Estimation of the number of signals in the presence of unknown correlated sensor noise. IEEE Trans. Signal Process., 40, (5), pp. 1053-1061.

5. CHEN W., REILLY J. P. WONG K.M.

- 1996 Detection of number of signals in noise with banded covariance matrices. IEE Proceedings. Radar, sonar and navigation. Vol. 143, num. 5, p. 289..294.

6. ARKHIPOV M.A., BALIN N.I., PANTYUSHOV V.P., SYRKOV V. A.

- 1984 Correlation of Dynamic Sea Noise on Discrete Lineal Arrays. Trudy LKI. Voprosy akustiki sudna y mirovogo okeana. Sankt-Petersburg (Leningrad), p. 52..57 (en ruso).

7. ARKHIPOV M.A.

- 1997 Un sistema de correlación pluricanal para detectar señales en presencia de ruidos donde ambos tienen espectros idénticos. TEMAS de ciencia y tecnología, Revista de la UTM, vol.1, Núm. 3, p.3-9.

8. ARKHIPOV M.A.

- 1999 Los ruidos de la superficie del mar en la salida de un sistema de correlación pluricanal. TEMAS de Ciencia y Tecnología, Revista de la UTM, Vol. 1, Num. 8, p. 3-16.

9. BALIN N.I., PANTYUSHOV V.P., SKOROBOGATOV I.A., SYRKOV V.A.

- 1979 Acoustical Field of Extended Source in Wedge. Trudy LKI. Sudovaya akustika. Sankt-Petersburg (Leningrad), p. 18..23 (en ruso).

10. URICK R.J.

- 1975 Principles of Underwater Sound. Mcgraw-Hill Book Company.

11. MATVIENKO V.N., TARASYUK Y. F.

- 1981 Operating Distances of Hydroacoustic Systems. Sudostroenie, Sankt-Petersburg (Leningrad).

12. GRADSCHEYN I.S., RYZHIK I.W.

- 1965 Tables of Integrals, Series, and Products. Academic Press, New-York.

13. KORN G.A, KORN T.M.

- 1961 Mathematical Handbook for Scientists and Engineers. New York, McGraw-Hill Book company, Inc.

14. BENDAT S. JULIUS.

- 1958 Principles and applications of Random Noise Theory. New York, John Wiley & Sons, Inc.

Mikhail Arkhipov.

Universidad Tecnológica de la Mixteca